

*Б. Л. Копчак**Національний університет "Львівська політехніка"**А. П. Кушнір**Львівський державний університет безпеки життєдіяльності*

РОЗРОБКА ТА РЕАЛІЗАЦІЯ БЛОКУ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ МАКСИМАЛЬНОГО ТЕПЛОВОГО ПОЖЕЖНОГО СПОВІЩУВАЧА З ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАТИ ARDUINO

Вступ. Для виявлення полумених пожеж одними з найкращих є теплові пожежні сповіщувачі. Вони найпростіші, не дорогі, прості та дешеві в обслуговуванні, дуже надійні, мають хорошу стійкість до різноманітних завад порівняно з іншими типами сповіщувачів, однак, мають найбільшу інерційність спрацювання. Існує ряд об'єктів, де виникають полуменеві пожежі або де є значне забруднення і тоді теплові пожежні сповіщувачі є незамінними у використанні. Загалом, теплові пожежні сповіщувачі більш стійкі до несприятливих умов середовища порівняно з іншими типами сповіщувачів. Зменшити час виявлення загорання тепловими пожежними сповіщувачами можна завдяки використанню новітніх технологій при розробці алгоритмів роботи на основі нечіткої логіки, нейронних мереж та сучасних мікроконтролерів. Ці математичні апарати дають змогу покращити технічні характеристики теплових сповіщувачів, зменшити їхню інерційність спрацювання. Вони також можуть зменшити хибність спрацювання пожежного сповіщувача та точно розпізнати загорання.

Мета роботи. Розробити блок нечіткої логіки максимального теплового пожежного сповіщувача з можливістю його реалізації в мікроконтролері на базі апаратно-обчислювальної платформи (плати) Arduino.

Основні результати дослідження. У цій статті розглядається так званий метод нечіткого висновку Сугено. Найпростіший спосіб візуалізувати системи Сугено першого порядку – це вважати, що кожне правило є визначенням місця розташування рухомої точки. Тобто одиночні вихідні піки можуть переміщатися лінійно у вихідному просторі, залежно від того, що є вхідним сигналом. Це також має тенденцію зробити такі системи дуже компактними та ефективними.

Для подальшого застосування плат Arduino для розробки та дослідження нечіткого блоку максимального пожежного сповіщувача, побудованого на основі нечіткої логіки, необхідне здійснення одного дуже важливого кроку – розібрати на елементарні складові і дослідити пакет Fuzzy Logic Toolbox, який надалі буде використовуватися як еталонний для розробки програми для Arduino. У випадку програмної реалізації нечіткого блоку в програмному середовищі Arduino найкращі результати отримуються при застосуванні функцій належності трикутної і трапецієподібної форми. В пакеті Fuzzy Logic Toolbox MATLAB/Simulink був розроблений нечіткий блок Сугено. Надалі він виступив еталонним на етапі створення нової моделі нечіткого блоку і її реалізації в пакеті MATLAB/Simulink для подальших досліджень точності та адекватності отриманої моделі. Розроблена нова модель нечіткого блоку Сугено нульового порядку в пакеті MATLAB/Simulink. Проведено дослідження точності і адекватності отриманої моделі, шляхом подачі лінійного наростаючого сигналу на вході зі швидкістю 1 од/сек. Результати збіглися, похибка відсутня. Отже отримана нова модель буде служити прототипом для створення нечіткого блоку максимального теплового пожежного сповіщувача в мікроконтролері плати Arduino.

В програмному комплексі Arduino з використанням мови програмування C була здійснена апаратна реалізація нечіткого блоку Сугено нульового порядку для одного входу на платі Arduino Mega 2560. Реалізація здійснена для масштабованого сигналу на вході і виході [0, 1]. Такий масштаб легко привести до робочої напруги плати Arduino 5 В. Після програмування плати Arduino було здійснено експериментальні дослідження шляхом зміни потенціометром напруги на вході плати від 0 до 5 В, що відповідає вихідному сигналу з давача температури DHT21/AM2301A. Крок зміни напруги на вході – 0,25 В.

Висновки. Розглянуто математичні основи нечіткого блоку Сугено. На їх основі для максимального теплового пожежного сповіщувача розроблено модель нечіткого блоку Сугено з одним входом у програмному середовищі MATLAB/Simulink. В ході проведених досліджень вона показала 100% точність і адекватність по відношенню до існуючої моделі у пакеті Fuzzy Logic Toolbox MATLAB/Simulink. На відміну від існуючої моделі запропоновану модель нечіткого блоку можна реалізувати в мікроконтролері. В програмному комплексі Arduino, була здійснена апаратна реалізація нечіткого блоку максимального теплового пожежного сповіщувача з використанням мови програмування C і плати Arduino Mega 2560. Після програмування Arduino було здійснено експериментальні дослідження. Похибка результату, обчисленого Arduino не перевищила 2,5%. Час виконання одного повного циклу нечіткого блоку – 0,004сек.

Ключові слова: система пожежної сигналізації, інтелектуальний пожежний сповіщувач, тепловий пожежний сповіщувач, нечітка логіка.

B. L. Kopchak

Lviv Polytechnic National University

A. P. Kushnir

Lviv State University of Life Safety

DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF THE INDISTINCT LOGIC BLOCK OF THE MAXIMUM THERMAL FIRE DETECTOR USING THE ARDUINO BOARD

Introduction. Heat detectors are one of the best ones that detect burning fires. They are the simplest, not expensive, cheap in maintenance, very reliable, have good resistance to various interferences compared to other types of detectors. However, they have the highest inertia of operation. There are some sites where the burning fires occur or where there exists significant pollution. Then heat detectors are indispensable in use. In general, heat fire detectors are more resistant to adverse environmental conditions compared to other types of detectors. It is possible to reduce the time of fire detection by heat detectors due to the use of the latest technologies in the development of algorithms based on fuzzy logic, neural networks and modern microcontrollers. These mathematical devices allow to improve technical characteristics of heat detectors and to reduce their inertia of operation. They can also reduce the error of the fire alarm and accurately detect fires.

Purpose. The research aims to develop a block of fuzzy logic of the static heat detector, with its possible realization in a microcontroller based on the Arduino board.

Results. The easiest way to visualize first-order Sugeno systems is to assume that each rule is a determination of the location of a moving point. That is, single-output peaks can move linearly in the output space, depending on what is the input signal. It also tends to make such systems very compact and efficient.

Further application of Arduino boards to develop and research a fuzzy block of a static heat detector based on fuzzy logic requires one very important step - to disassemble the elementary components and explore the Fuzzy Logic Toolbox. In the future, it will be used as a reference for the development of the program for Arduino. In the case of software realization of a fuzzy block in the Arduino software environment, the best results are obtained when membership functions of the triangular and trapezoidal shape are used. In the Fuzzy Logic Toolbox MATLAB/Simulink package, a Sugeno fuzzy block was developed. Subsequently, it served as a reference at the stage of creating a new fuzzy block model and its realization in the MATLAB/Simulink package for further studies of the accuracy and adequacy of the obtained model. A new model of zero-order Sugeno fuzzy block in the MATLAB/Simulink package has been developed. A study of the accuracy and adequacy of the obtained model by applying a linear incremental signal at the input at a rate of 1 unit/sec has been conducted. The results coincided, there is no error. The resulting new model will serve as a prototype for creating a fuzzy block of the static heat detector in the microcontroller of the Arduino board.

In the Arduino software package, using the C programming language, a zero-order Sugeno fuzzy block for one input on an Arduino Mega 2560 board was realized. The realization is performed for a scalable signal at the input and output [0, 1]. This scale can easily lead to an operating voltage of 5 V of the Arduino board. After programming the Arduino board, experimental studies were performed by changing the voltage potentiometer at the input of the board from 0 to 5 V. This corresponds to the output signal from the temperature sensor DHT21/AM2301A. The step-change of input voltage 0.25 V.

Conclusions. The mathematical bases of the Sugeno fuzzy inference method are considered. Based on them, a model of a Sugeno fuzzy block with one input in the MATLAB/Simulink software environment for the static heat detector was developed. In the course of the research, it showed 100% accuracy and adequacy about the existing model in the package Fuzzy Logic Toolbox MATLAB/Simulink. In contrast to the existing model, the proposed fuzzy block model can be implemented in a microcontroller. In the Arduino software package, the hardware realization of the fuzzy block of the static heat detector was carried out using the C programming language and the Arduino Mega 2560 board. After Arduino programming, experimental studies were performed. The error of the result calculated by the Arduino did not exceed 2.5%. The execution time of one complete cycle of a fuzzy block is 0,004 sec.

Keywords: fire detection system, intelligent fire detector, heat detector, indistinct logic.

Постановка проблеми. Розвиток людської цивілізації почався з вогню. Крім значних переваг і можливостей, вогонь є причиною пожеж, які несуть велику небезпеку для людей та втрат матеріальних цінностей. Щоб уберегтися від пожеж, людина винайшла багато способів і систем протипожежного захисту. Однією із таких систем є система пожежної сигналізації (СПС). СПС призначені для виявлення займання на ранній стадії розвитку, щоб люди якомога швидше могли безпечно евакуюватися з осередку

пожежі. Крім того, займання, яке виявлене на ранній стадії у більшості випадків можна легко ліквідувати підручними засобами, ще до того, як станеться трагедія та/або буде пошкоджене майно. Аналіз Національної асоціації протипожежного захисту США показує, що при пожежі СПС знижують небезпеку загинути майже на 50 відсотків. Тому дуже важливо, щоб ці системи були правильно спроектовані і правильно вибране обладнання, щоб зберегти життя людей та майно. Враховуючи значні

збитки, часто пов'язані з пожежею, час є критичним фактором виявлення пожежі. На швидкість виявлення займання СПС впливають різні фактори, наприклад: вибраний тип пожежного сповіщувача (ПС), алгоритм роботи ПС, місце розміщення ПС, тип пожежі тощо. Пожежа на об'єкті може статися в будь-який час дня і ночі. Ці пожежі можуть бути тліючими або полуменевими. Обидва типи пожеж створюють небезпечні умови для всіх, хто перебуває в осередку займання. Тліючі пожежі – це пожежі, які повільно розвиваються, виділяють мінімальну кількість тепла та значну кількість диму. Такі пожежі добре виявляють димові або газові ПС. Полуменеві пожежі – це пожежі, які швидко розвиваються, виділяють мінімальну кількість диму, характеризуються відкритим полум'ям та надзвичайно високою температурою. Такі пожежі добре виявляють теплові ПС або ПС полум'я.

Теплові ПС бувають трьох типів [1, 2]: максимальні (статичні), максимально-диференційні та максимально-інтегральні. Максимальні теплові ПС бувають різних класів. Вони в умовах значних коливань температур за короткі проміжки часу працюють стабільніше. Придатні для використання за умов, коли навколишня температура може швидко змінюватися протягом коротких проміжків часу. Однак їх заборонено використовувати на об'єктах, де можлива мінусова температура, оскільки виявлення пожежі такими сповіщувачами відбувається із затримкою в часі порівняно з виявленням пожежі, яка може відбутися при плюсових температурах. Максимально-диференційні теплові ПС спрацьовують, як на перевищення температури встановленого порогового значення, так і на перевищення заданого значення швидкості зміни температури протягом певного проміжку часу, наприклад, 9 °C/хв. Вони ефективніші і чутливіші за звичайні максимальні теплові ПС та виявляють загорання як при повільному, так і при швидкому зростанні температури. Придатніші для застосування за умов, коли температура навколишнього середовища низька. У деяких випадках за ефективністю вони можуть конкурувати з димовими ПС. Не дивлячись, що димові ПС виявляють тліючі пожежі на початковій стадії займання, їх не можна використовувати в забруднених місцях.

Найкращими вважаються комбіновані або, як їх ще називають, мультисенсорні ПС. Вони добре виявляють як тліючі, так і полуменеві пожежі. Однак в них закладені складні алгоритми обробки сигналів, які потребують для реалізації дорожчу елементну базу, а отже, їх вартість в рази вища від димових та теплових ПС, що здорожчує СПС та її

обслуговування. Знову ж таки, наявність димового сенсора робить неможливим їх використання в забруднених місцях.

Теплові ПС – найпростіші, не дорогі, прості та дешеві в обслуговуванні, дуже надійні, мають хорошу стійкість до різноманітних завад порівняно з іншими типами ПС. Але вони мають найбільшу інерційність спрацювання. Однак, існує ряд об'єктів, де виникають полуменеві пожежі або де є значне забруднення. Тоді теплові ПС є незамінними у використанні. Загалом, теплові ПС більш стійкі до несприятливих умов середовища порівняно з іншими типами ПС. Частка використання теплових ПС у світі є досить вагомою, що підтверджується значними обсягами їх випуску виробниками продукції протипожежного захисту, зокрема: ТОВ “Тірас-12” (Україна), ПП “Артон” (Україна), СКБ “Електронмаш” (Україна), фірма System Sensor (Швейцарія), компанія SECURITON AG (Швейцарія), компанія Protectowire, Inc. (США). Скоротити час виявлення загорання тепловими ПС можна шляхом впровадження новітніх технологій при розробці алгоритмів роботи на основі нечіткої логіки, нейронних мереж та сучасної елементної бази (мікроконтролерів).

Аналіз останніх досягнень і публікацій.

Недоліків ПС, які використовують інформацію лише з одного чутливого елемента, до яких відносяться теплові ПС, а отже і СПС, можна позбутися за допомогою розробки алгоритмів роботи ПС на основі методів виявлення пожежі нейронними мережами або нечіткою логікою, яка є простішою. Ці математичні апарати дають змогу покращити технічні характеристики теплових ПС, зменшити їхню інерційність спрацювання. Вони також можуть зменшити хибність спрацювання ПС та точно виявити загорання, що має велике значення для безпеки людей та майна.

Нечіткі контролери, побудовані на основі нечіткої логіки, здатні замінити людське мислення (людський досвід), приймаючи ефективні рішення на основі такої мовної інформації, як лінгвістичні змінні, лінгвістичні терми та бази нечітких правил. За допомогою нечітких контролерів інженери можуть використовувати міркування людини в алгоритмі керування. Нечітке керування – це метод керування, заснований на нечіткій логіці. Розробка нечіткої логічної системи не базується на процесі математичного моделювання, це швидше нелінійне відображення, засноване на процесі експертної системи, що називається нечітким висновком. Вона краще, за розроблені математичні моделі, використовує інженерний досвід, накопичений за роки випробувань. За своєю природою нечітка логіка є інваріантною в

часі, нелінійною і здатною вирішувати складні нелінійні задачі керування з багатьма параметрами порівняно з іншими багатопараметричними системами. Усе більше нечітку логіку використовують для побудови алгоритмів виявлення пожеж ПС.

Для дослідження та відлагодження розроблених алгоритмів роботи ПС на основі нечіткої логіки науковці все більше використовують апаратно-обчислювальні платформи (плати) Arduino з мікроконтролерами Atmel ATmega328 або ATmega32U4. Arduino представляє собою фізичну плату з мікроконтролером і спеціальне програмоване середовище для написання програмного забезпечення для цього мікроконтролера. Arduino може використовуватися для розробки інтерактивних систем, які керують різними давачами. На відміну від більшості програмованих мікроконтролерів Arduino має ряд переваг: не потрібно окремого апаратного забезпечення (програматора) для завантаження нового коду на плату; програмне забезпечення Arduino працює на операційних системах Windows, Macintosh OSX і Linux; просте і зручне середовище програмування; розширене програмне забезпечення з відкритим вихідним кодом; можливість використання C++ бібліотек; розширюване відкрите апаратне забезпечення.

В статті [3] нечіткий контролер реалізований за допомогою Android Studio, XML та Java, мови програмування для пристроїв Android. На відміну від традиційних ПС, ця робота базується на розробці ПС для автоматичного виявлення займання із використанням нечіткого логічного підходу 2-го типу з метою підвищення надійності усієї системи та зменшення помилкових спрацювань. Для реалізації нечіткого контролера використовувалася нечітка модель Мамдані. Однак, плата Arduino Nano (Італія) використовувалася лише для збору інформації від різних давачів та передачі їх через модуль Wi-Fi ESP8266 до модуля контролера нечіткої логіки, що реалізований на Android.

В статті [4] автори використовують плату Arduino Uno з давачами температури, газу CO та полум'я для побудови ПС з пристроєм гасіння пожежі. Для аналізу значення величини температури складена теплова модель будинку. Однак в ПС реалізований простий алгоритм роботи. Він спрацьовує, коли значення контрольованих ознак пожежі перевищують порогові задані значення.

В статті [5] запропонована інтелектуальна система виявлення та запобігання пожежам, яка реалізована за допомогою плати Arduino Uno. Мікроконтролер приймає вхідні сигнали від

декількох давачів температури, диму та полум'я, розміщених у різних контрольованих місцях, і поєднує в собі інтегровану нечітку логіку для визначення місць та ступеня ймовірності пожежі. Алгоритм злиття даних дає змогу системі відкидати оманливі ознаки, які не пов'язані з пожежею. Однак, для досягнення поставленої мети автори використовують роботи інших авторів і ця система не може бути реалізована для масового впровадження згідно з європейським стандартом EN-54.

В статті [6] нечітка логіка застосовується для розробки інтелектуальної системи моніторингу та запобігання пожежам. Система складається з плати Arduino Uno, давачів температури, вологості та полум'я. Вхідними змінними для нечіткої логіки Мамдані є швидкість зміни температури, вологості та час. Вихідний сигнал з давача полум'я використовувався для підтвердження пожежі, як булева функція "Так", "Ні". Працездатність системи була перевірена в програмному середовищі MATLAB. Однак, плата Arduino Uno використовувалася лише для збору інформації, яка надалі була використана для розробки моделі і реалізації її в програмному середовищі MATLAB. Терми функцій належності швидкість зміни температури, вологості та часу не перетиналися, а отже не можна говорити про невизначеність.

В статті [7] автори розробили мультисенсорну систему виявлення пожежі на основі нечіткої логіки. Мікроконтролер ATmega328 на платі Arduino обробляє дані з давача диму, температури та полум'я за допомогою розробленого алгоритму нечіткої логіки. Для кожної лінгвістичної змінної було створено функцію належності з трьома термами. База нечітких правил складається з 27 правил. На платі Arduino був реалізований алгоритм нечіткої логіки. Як стверджують автори, через обчислювальні обмеження, пов'язані з платформою на базі мікроконтролера, у реалізації запропонованого алгоритму була використана вже готова вбудована бібліотека нечіткої логіки eFLL. В статті не зазначається, яка саме нечітка модель була використана для реалізації нечіткої логіки, яким чином вона була реалізована і наскільки вона адекватна нечіткій логіці, реалізованій в програмному середовищі MATLAB.

В роботі [8] для виявлення та ліквідації потенційних пожеж у моторному відсіку двигуна та акумулятора гібридного електромобіля пропонується нова нечітка детермінована система неконтрольованого типу. На вході нечіткої логіки Мамдані надходять сигнали з давачів температури та вологості, які розміщені в моторному відсіку,

та з давачів напруги та струму, які розміщені в акумуляторному відсіку. Встановлено форми і параметри вхідних та вихідних функцій належності. Нечітка логіка Мамдані використовується для побудови всієї системи виявлення пожежі. Однак, в статті не зазначено, як реалізується нечітка логіка Мамдані для мікронтролера.

В роботі [9] автори для автомобіля запропонували систему виявлення пожежі та керування пожежогасінням, яка побудована з використанням нечіткої логіки. Система виявлення пожежі складається з давачів полум'я, температури та диму. Залежно від характеристик навколишнього середовища усі вони розміщені в різних місцях. Для контролю за моторним відсіком використовували давач температури. Запропонована система реалізується на платі Arduino та виявляє загорання протягом 20 секунд. Однак в статті не зазначено яка нечітка логіка використовується і як вона реалізується в платі Arduino.

В статті [10] розроблений алгоритм роботи СПС на основі нечіткої логіки з використанням плати Arduino для автомобіля. Система керування нечіткою логікою була розроблена за допомогою MATLAB R2014a та реалізована в платі Arduino. Однак як саме здійснюється програмування плати в статті не зазначено.

В статті [11] було розроблено алгоритм роботи димотеплого ПС на основі нечіткої логіки. Вхідними змінними для блоку нечіткої логіки є зміна температури, похідної температури та задимленості. Для кожної лінгвістичної змінної було створено функцію належності з трьома термами. Для створення моделі блоку нечіткої корекції використано уже готовий пакет Fuzzy Logic Toolbox програмного середовища MATLAB. Однак в статті проведено лише моделювання в пакеті Fuzzy Logic Toolbox і ця модель не дає змогу реалізувати цей алгоритм роботи в мікроконтролері. В статті [12] було розроблено алгоритм роботи теплового ПС на основі нечіткої логіки. Однак, як і в статті [11], проведено лише моделювання в пакеті Fuzzy Logic Toolbox уже з реалізованим у ньому блоком нечіткої логіки. Дана нечітка логіка не дає змоги реалізувати її в мікроконтролері і для практичного застосування потребує нової розробки.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є розробити блок нечіткої логіки максимального теплового ПС з метою його реалізації в мікроконтролері на базі апаратно-обчислювальної платформи (плати) Arduino.

Для досягнення поставленої мети потрібно виконати такі завдання:

- розглянути математичні основи нечіткого блоку Сугено та на їх основі розробити нову модель нечіткого блоку Сугено нульового порядку з одним входом в пакеті MATLAB Simulink;

- розроблену модель нечіткого блоку Сугено порівняти з моделлю, яка запропонована в пакеті Fuzzy Logic Toolbox програмного середовища MATLAB;

- на основі розглянутої математичної основи апаратно реалізувати запропонований нечіткий блок Сугено нульового порядку для одного входу використавши мову програмування C і плату Arduino Mega 2560;

- після програмування плати Arduino провести експериментальні дослідження.

Результати роботи. Для дослідження різноманітних нечітких (fuzzy) систем в програмному пакеті MATLAB/Simulink існує розроблений спеціалізований пакет Fuzzy Logic Toolbox, що є спеціалізованим набором функцій для аналізу, проектування та моделювання систем, створених на основі теорії нечітких множин. Цей пакет широко використовується для аналізу, синтезу і моделювання різноманітних інтелектуальних систем за використання апарату нечіткої логіки.

Fuzzy Logic Toolbox містить в собі засоби створення та редагування нечітких блоків таких типів:

- система інференції Мамдані (Mamdani's fuzzy inference method) – вихідна функція є нечіткою змінною для кожного правила;

- система інференції Сугено (Sugeno's fuzzy inference method) – вихідна величина є константою або лінійною комбінацією вхідних змінних для кожного правила.

Створені за допомогою Fuzzy Logic Toolbox нечіткі системи можуть бути змодельовані за допомогою програми Simulink.

У цій статті розглядається так званий метод нечіткого висновку Сугено (англ. Sugeno) скорочена назва від Такагі-Сугено-Канга (англ. Takagi-Sugeno-Kang). Запроваджений у 1985 р., він багато в чому подібний до методу Мамдані. Перші дві частини процесу нечіткого висновку, нечіткі входи та застосування нечіткого оператора, абсолютно однакові. Основна відмінність між Мамдані та Сугено полягає в тому, що функції належності вихідних даних Сугено є або лінійні залежності від вхідних сигналів, або постійні величини.

Типове правило в нечіткій моделі Сугено першого порядку, для випадку якщо функції належності вихідних даних є лінійні залежності від двох вхідних сигналів:

якщо $Vx\dot{d}1 = x$ і $Vx\dot{d}2 = y$, то (вихід буде)

$$z = ax + by + c. \quad (1)$$

де a, b – коефіцієнти лінійної залежності від вхідних сигналів; c – постійний коефіцієнт.

Для нечіткої моделі Сугено нульового порядку (zero-order) вихідний рівень z є константою ($a = b = 0$)

$$z = c. \quad (2)$$

Вихідний рівень z_i кожного правила зважується ваговим коефіцієнтом w_i правила. Наприклад, для правила I (англ. AND) якщо $v_{x\dot{d}1} = x$ і $v_{x\dot{d}2} = y$, ваговий коефіцієнт дорівнює

$$w_i = \text{AndMethod}(\mu_1(x), \mu_2(y)), \quad (3)$$

де $\mu_1(x)$, $\mu_2(y)$ – функції належності для входів 1 і 2.

Кінцевим результатом системи є середнє зважене значення всіх правил виходів даних, обчислене як

$$\text{FinalOutput} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i z_i}{\sum_{i=1}^N w_i}, \quad (4)$$

де N – кількість правил.

Правило Сугено для двох входів працює, як показано на наступній діаграмі (рис. 1). Проте цю діаграму можна легко переробити для випадку одного входу, забравши зайві блоки.

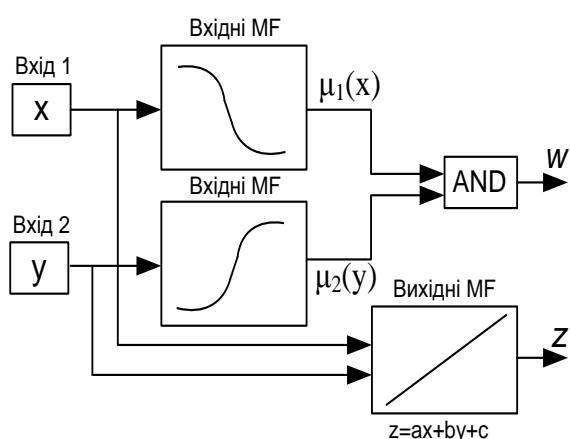


Рисунок 1 – Робота алгоритму Сугено для двох входів

Найпростіший спосіб візуалізувати системи Сугено першого порядку (first-order) – це вважати, що кожне правило є визначенням місця розташування рухомої точки. Тобто одиночні вихідні піки можуть переміщатися лінійно у вихідному просторі, залежно від того, що є вхідним сигналом. Це також має тенденцію

зробити такі системи дуже компактними та ефективними. Можливі нечіткі моделі Сугено вищого порядку, але вони вносять значну складність з мало очевидними перевагами. Програмне забезпечення Fuzzy Logic Toolbox не підтримує нечіткі моделі Сугено, функції вихідного рівняння яких перевищують перший порядок.

Пакет Fuzzy Logic Toolbox в MATLAB/Simulink широко застосовується для дослідження та відлагодження розроблених алгоритмів роботи ПС на основі нечіткої логіки. Проте цей пакет Fuzzy Logic Toolbox був розроблений вже давно і протягом 20 років не змінювався, крім того, як і в багатьох продуктах пакету MATLAB/Simulink, не до кінця описана його математична основа. Тому для подальшого застосування плат Arduino для дослідження алгоритмів роботи ПС, побудованих на основі нечіткої логіки, необхідне здійснення одного дуже важливого кроку – розібрати на елементарні складові і дослідити пакет Fuzzy Logic Toolbox, який надалі буде використовуватися як еталонний для розробки програми моделі нечіткого блоку максимального теплового ПС для плати Arduino. Далі, для оцінки адекватності розглянутої структури, потрібно модель нечіткого блоку детально скласти у вигляді моделі і реалізувати в пакеті MATLAB/Simulink, а також дослідити точність і адекватність отриманої моделі. Далі, у випадку успішної реалізації моделі нечіткого блоку, його можна використати як основу для програмної реалізації нечіткого блоку теплового ПС в програмному середовищі Arduino.

У випадку програмної реалізації нечіткого блоку в програмному середовищі Arduino найкращі результати отримують при застосуванні функцій належності трикутної і трапецієподібної форм. Трикутна крива є функцією належності і залежить від трьох скалярних параметрів a, m і b , як зазначено у

$$\mu_A(x; a, m, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & a < x \leq m \\ \frac{m-x}{b-x}, & m < x \leq b \\ 0, & x \geq b \end{cases}, \quad (5)$$

або більш компактно –

$$\mu_A(x; a, m, b) = \max(\min(\frac{x-a}{m-a}, \frac{b-x}{b-m}), 0).$$

Параметри a і c визначають "ноги" трикутника, а параметр m – пік.

Трапецієподібна крива є функцією належності і залежить від чотирьох скалярних параметрів a, b, c і d , як зазначено

$$\mu_A(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases}, \quad (6)$$

або більш компактно –

$$\mu_A(x; a, b, c, d) = \max(\min(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}), 0).$$

Параметри a і d визначають розташування «стоп» трапеції, а параметри b і c – «плечей».

Спочатку це завдання розглянемо на прикладі нечіткого регулятора Сугено з такими параметрами:

– кількість областей належності для вхідної змінної температури дорівнює 3: $In = \{PS, PM, PL\}$, функції належності трикутні і

розміщені рівномірно, що відповідає: PS – нормальна, PM – підвищена; PL – висока;

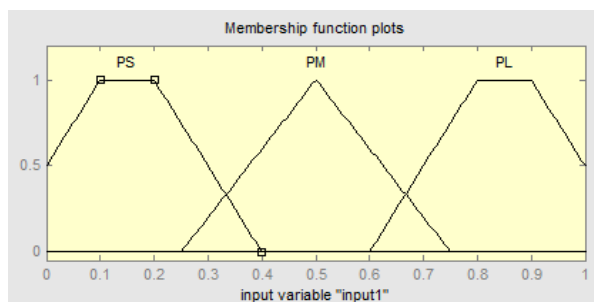
– кількість функцій належності для вихідного сигналу блоку дорівнює 3: $Out = \{N, PF, F\}$, функції належності постійні коефіцієнти і розміщені рівномірно, що відповідає: N – норма, PF – передпожежний стан (“імовірність пожежі 50%”); F – пожежа;

– Т-норма – \min , а S-норма – \max ;

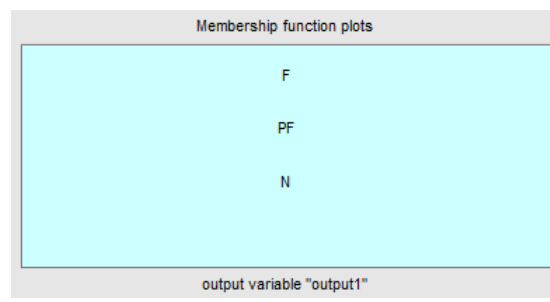
– база правил регулятора має вигляд:

	In		
	PS	PM	PL
N	1	0	0
PF	0	1	0
F	0	0	1

На рис. 2 показано функції належності для вхідної (рис. 2а) і вихідної (рис. 2б) змінних.



а)



б)

Рисунок 2 – Функції належності: а) для вхідної змінної; б) для вихідної змінної

Параметри функції належності: вхідна змінна PS $[-0.1 \ 0.1 \ 0.2 \ 0.4]$, PM $[0.25 \ 0.5 \ 0.75]$, PL $[0.6 \ 0.8 \ 0.9 \ 1.1]$; вихідна змінна N $[0]$, PF $[0.5]$, F $[1]$.

Таким чином в пакеті Fuzzy Logic Toolbox MATLAB/Simulink був розроблений нечіткий регулятор Сугено (рис. 3), який надалі виступить еталоном на етапі створення нової моделі нечіткого

блоку і її реалізації в пакеті MATLAB/Simulink для подальших досліджень точності і адекватності отриманої моделі. На основі розглянутої математичної основи (1) – (6) була розроблена нова модель нечіткого блоку Сугено нульового порядку в пакеті MATLAB/Simulink (рис. 3).

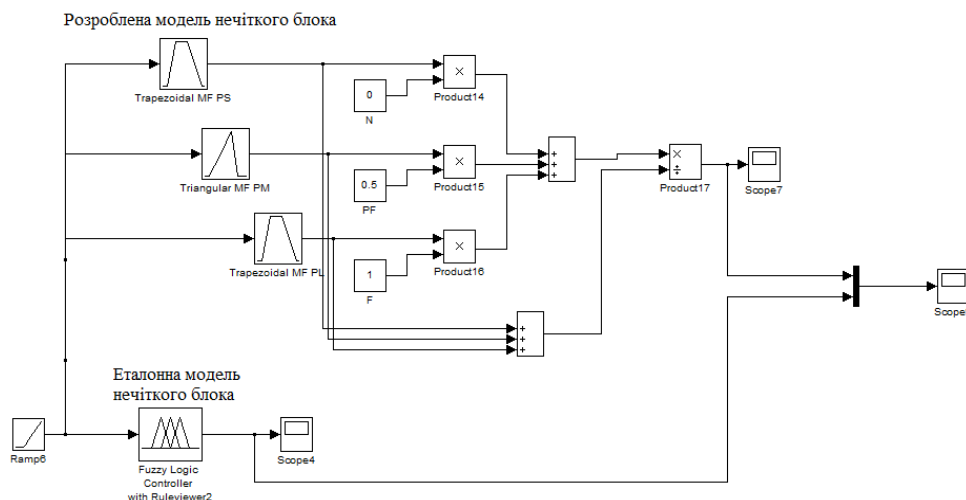


Рисунок 3 – Модель нечіткого блоку Сугено: етальонна існуюча модель і нова модель нечіткого блоку

Тепер проведемо дослідження точності і адекватності отриманої моделі шляхом подачі лінійного наростаючого сигналу на вході зі швидкістю 1 од/сек. (рис. 4а). На рис. 4б показаний вихідний сигнал еталонного існуючого нечіткого регулятора Сугено (1) і нової моделі

нечіткого блоку Сугено нульового порядку (2). Як бачимо результати збіглися ідеально, похибка відсутня. Отже отримана нова модель буде служити прототипом для створення нечіткого блоку теплового ПС в мікроконтролері плати Arduino.

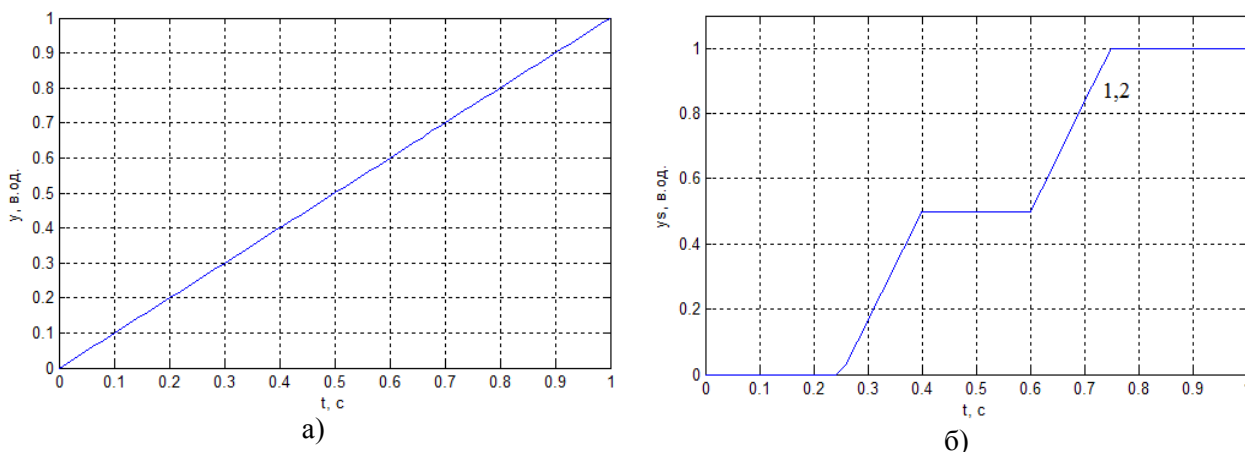


Рисунок 4 – Результати дослідження моделей нечіткого блоку Сугено:

а) лінійно наростаючий сигнал на вході моделей; б) вихідний сигнал: 1 – еталонної існуючої моделі нечіткого блоку Сугено; 2 – розробленої моделі нечіткого блоку Сугено нульового порядку

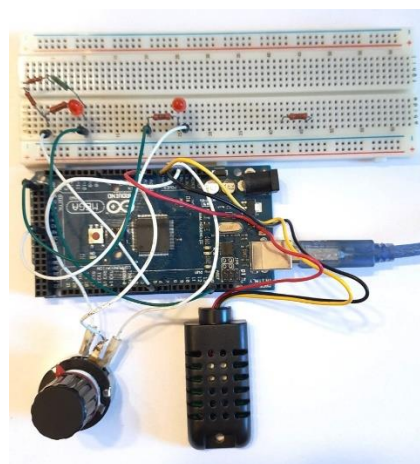
На основі попередньо розробленої і відлагодженої моделі нечіткого блоку в MATLAB/Simulink перейдемо до його реалізації за використання мови програмування С і плати Arduino Mega 2560. Плата Arduino Mega 2560 створена на основі мікроконтролера

Atmel AT Mega 2560, яка має тактову частоту 16 МГц (кварцовий генератор 16 МГц);

Зовнішній вигляд комплексу «комп'ютер – плата Arduino Mega 2560» зображено на рис. 5а, а зовнішній вигляд плати Arduino Mega 2560 під час виконання експериментальних досліджень – на рис. 5б.



а)



б)

Рисунок 5 – Проведення дослідження:

а) зовнішній вигляд комплексу «комп'ютер – плата Arduino Mega 2560»; б) плата Arduino Mega 2560

Потенціометром змінюється аналоговий сигнал завдання на вході, який імітує зміну завдання від датчика температури. Надалі використовувався датчик температури та вологості DHT21/AM2301A. Значення з виходу чутливого елемента вологості брати до уваги не будемо. DHT21/AM2301A – зовнішній датчик температури

та вологості підвищеної точності. Під'єднується по однопровідному інтерфейсу.

В програмному комплексі Arduino на основі розглянутої математичної основи (1) – (6) була здійснена апаратна реалізація запропонованою нечіткого блоку Сугено нульового порядку для одного входу (рис. 6). Реалізація здійснена для масштабованого сигналу на вході і виході [0, 1].

Потім такий масштаб легко привести до робочої напруги плати Arduino 5 В. Після програмування плати Arduino було здійснено експериментальні дослідження шляхом зміни потенціометром напруги на вході плати від 0 до 5 В і фіксації згенерованого нечітким блоком сигналу, який можна аналізувати осцилографом, але це буде менш точно, або значенням реєстру Arduino, який

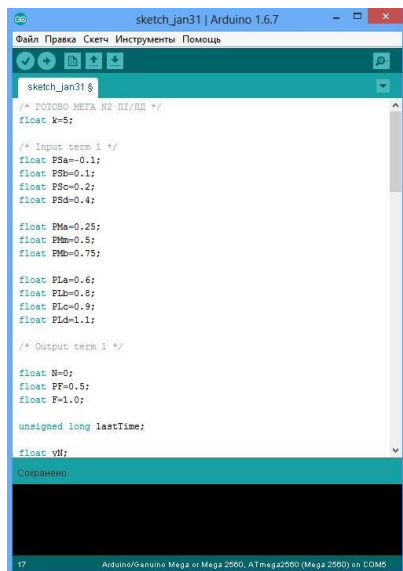


Рисунок 6 – Програмний комплекс Arduino

Похибка результату, обчисленого Arduino, не перевищила 2,5%. Похибка спричинена розрядністю даних в Arduino, оскільки використано змінні типу float, а також 8-бітний цифро-аналоговий перетворювач. Можна збільшити розрядність, шляхом встановлення змінної типу double float, однак зменшиться швидкодія мікроконтролера. Час виконання одного повного циклу нечіткого блоку – 0,004 с, але швидкодію можна дещо збільшити програмною оптимізацією. Отже реалізовано блок нечіткої логіки максимального теплового ПС з нечітким блоком Сугено на базі плати Arduino.

Висновки

1. Розглянуто математичні основи нечіткого блоку Сугено. На їх основі для максимального теплового пожежного сповіщувача розроблено модель нечіткого блоку Сугено нульового порядку з одним входом в пакеті MATLAB Simulink і з можливістю реалізації її на мікроконтролері на базі плати Arduino.

2. Результати моделювання в програмному середовищі MATLAB/Simulink показали 100% точність і адекватність розробленої моделі нечіткого блоку Сугено нульового порядку з одним входом по відношенню до існуючої в пакеті Fuzzy Logic Toolbox.

формує вихідну напругу на реальному виході. Крок зміни напруги на вході – 0,25 В. На рис. 7 показано еталонне значення вихідного сигналу нечіткого блоку (крива чорного кольору), обчислене в MATLAB/Simulink, і реальне значення вихідного сигналу нечіткого блоку (крива червоного кольору), обчислене Arduino і подане на вихідний реєстр, який формує реальний сигнал на виході.

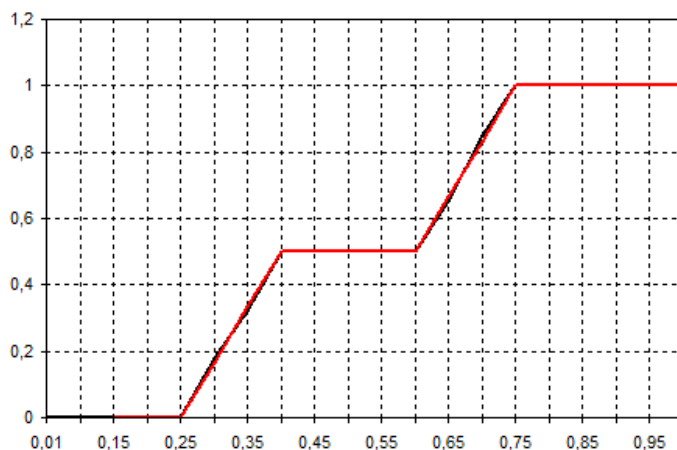


Рисунок 7 – Вихідний сигнал нечіткого блоку Сугено: чорна крива – еталонне значення вихідного сигналу нечіткого блоку, обчислене в MATLAB/Simulink; червона крива – реальне значення вихідного сигналу нечіткого блоку, обчислене Arduino і подане на вихідний реєстр

3. В програмному комплексі Arduino, на основі розглянутої математичної основи, була здійснена апаратна реалізація нечіткого блоку Сугено нульового порядку максимального теплового ПС з використанням мови програмування C і плати Arduino Mega 2560.

4. Після програмування плати Arduino було здійснено експериментальні дослідження. Похибка результату, обчисленого Arduino не перевищила 2,5%. Таким чином підтверджено працездатність нечіткого блоку Сугено нульового порядку максимального теплового ПС. Похибка спричинена розрядністю даних в Arduino, оскільки використано змінні типу float, та розрядністю цифро-аналогового перетворювача. Час виконання одного повного циклу нечіткого блоку – 0,004с.

Список літератури:

1. ДСТУ EN 54-5:2003. Системи пожежної сигналізації. Частина 5. Сповіщувачі пожежні теплові точкові (EN 54-5:2000, IDT). [Чинний від 2004-07-01]. Вид. офіц. Київ: Держспоживстандарт України, 2004. 36 с.
2. ДСТУ EN 54-5:2019. Системи пожежної сигналізації. Частина 5. Сповіщувачі пожежні теплові точкові (EN 54-5:2017 + A1:2018, IDT). [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ : ДП “УкрНДНЦ”, 2019.

3. Uduak Umoh, Udoinyang G. Inyang, and Emmanuel E. Nyoho. Interval Type-2 Fuzzy Logic for Fire Outbreak Detection. *International Journal on Soft Computing, Artificial Intelligence and Applications (IJSCAI)*. August 2019. Vol.8. No.3. pp. 27–46.

4. Md. Rawshan Habib, Naureen Khan, Koushik Ahmed, Mahbubur Rahman Kiran, A.K.M. Asif, Mohaiminul Islam Bhuiyan, Omar Farrok. Quick Fire Sensing Model and Extinguishing by Using an Arduino Based Fire Protection Device. *Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*: Proceedings of the 5th International Conference, Dhaka, Bangladesh, 26-28 Sept. 2019, Dhaka, 2019. pp. 435–439.

5. Md Iftekharul Mobin, Md Abid-Ar-Rafi, Md Neamul Islam, and Md Rifat Hasan. An Intelligent Fire Detection and Mitigation System Safe from Fire (SFF). *International Journal of Computer Applications*. 2016. Vol. 133. pp. 1-6.

6. Sarwar, B., Bajwa, I. S., Shabana, R., Ramzan, B. and Kausar, M. Design and Application of Fuzzy Logic Based Fire Monitoring and Warning Systems for Smart Buildings. *MDPI Symmetry*, 2018. Vol. 10(11), Issue 615. pp. 1-24.

7. R. Sowah, A. R. Ofoli, S. Krakani, and S. Fiawoo. Hardware module design of a real-time multi-sensor fire detection and notification system using fuzzy logic. *IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, 5–9 Oct. 2014. Vancouver, BC, Canada, 2014. pp. 1–6.

8. M. S. Dattathreya, H. Singh, and T. Meitzler. Detection and elimination of a potential fire in engine and battery compartments of hybrid electric vehicles. *Advances in Fuzzy Systems*. 2012. Oct. Vol. 2012(5).

9. R. Sowah, K. O. Ampadu, A. Ofoli, K. Koumadi, G. A. Mills, and J. Nortey. Design and implementation of a fire detection and control system for automobiles using fuzzy logic. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 2-6 Oct. 2016. Portland, OR, USA, 2016. pp. 1–8.

10. Sowah, R., Ampadu, K. O., Ofoli, A. R., Koumadi, K., Mills, G. A., Nortey, J. A Fire-Detection and Control System in Automobiles: Implementing a Design That Uses Fuzzy Logic to Anticipate and Respond. *IEEE Industry Applications Magazine*. March-April 2019. Vol. 25, Issue 2. pp. 57–67.

11. Andrii Kushnir, Bohdan Kopchak. Development of Intelligent Point Multi-Sensor Fire Detector With Fuzzy Correction Block. *Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)* : Proceedings of the XVth International Conference, Polyana, Ukraine, May 2019, Polyana, 2019. pp. 41-45.

12. Кушнір А.П., Копчак Б.Л. Реалізація пожежного сповіщувача з використанням нечіткої логіки. *Пожежна безпека*. 2009. №14. С. 50-55.

References:

1. EN 54-5:2000/A1:2002. Fire detection and fire alarm system – Part 5: Heat detectors. –Point detectors.

2. EN 54-5:2017+A1:2018. Fire detection and fire alarm systems — Part 5: Heat detectors — Point heat detectors.

3. Uduak Umoh, Udoinyang G. Inyang, and Emmanuel E. Nyoho. (2019). “Interval Type-2 Fuzzy Logic for Fire Outbreak Detection”, *International Journal on Soft Computing, Artificial Intelligence and Applications (IJSCAI)*, vol.8. no.3. pp. 27–46.

4. Md. Rawshan Habib, Naureen Khan, Koushik Ahmed, Mahbubur Rahman Kiran, A.K.M. Asif, Mohaiminul Islam Bhuiyan, Omar Farrok. (2019). “Quick Fire Sensing Model and Extinguishing by Using an Arduino Based Fire Protection Device”, *Proceedings of the 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE)*, Dhaka, Bangladesh, 26-28 Sept. 2019, Dhaka, pp. 435–439.

5. Md Iftekharul Mobin, Md Abid-Ar-Rafi, Md Neamul Islam, and Md Rifat Hasan. (2016). “An Intelligent Fire Detection and Mitigation System Safe from Fire (SFF)”, *International Journal of Computer Applications*, vol. 133. pp. 1-6.

6. Sarwar, B., Bajwa, I. S., Shabana, R., Ramzan, B. and Kausar, M. (2018). “Design and Application of Fuzzy Logic Based Fire Monitoring and Warning Systems for Smart Buildings”. *MDPI Symmetry*, vol. 10(11), Issue 615. pp. 1-24.

7. R. Sowah, A. R. Ofoli, S. Krakani, and S. Fiawoo. (2014). “Hardware module design of a real-time multi-sensor fire detection and notification system using fuzzy logic”. *IEEE Industry Application Society Annual Meeting*, Vancouver, BC, Canada. 5–9 Oct. 2014. pp. 1–6.

8. M. S. Dattathreya, H. Singh, and T. Meitzler. (2012). Detection and elimination of a potential fire in engine and battery compartments of hybrid electric vehicles. *Advances in Fuzzy Systems*. 2012. Oct. Vol. 2012(5).

9. R. Sowah, K. O. Ampadu, A. Ofoli, K. Koumadi, G. A. Mills, and J. Nortey. (2016). “Design and implementation of a fire detection and control system for automobiles using fuzzy logic”. *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Portland, OR, USA, 2-6 Oct. 2016, Portland, pp. 1–8.

10. Sowah, R., Ampadu, K. O., Ofoli, A. R., Koumadi, K., Mills, G. A., Nortey, J. (2019). “A Fire-Detection and Control System in Automobiles: Implementing a Design That Uses Fuzzy Logic to Anticipate and Respond”. *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 25, issue 2. pp. 57–67.

11. Andrii Kushnir, Bohdan Kopchak. (2019). “Development of Intelligent Point Multi-Sensor Fire Detector With Fuzzy Correction Block”. *Proceedings*

of the XVth International Conference on Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEM-STECH), Polyana, Ukraine, May 2019, Polyana, pp. 41-45.

12. A. Kushnir, B. Kopchak. (2009). "Realization of fire-alarm box with the usage of fuzzy logic". *Fire safety*. №14. pp. 50-55.

* **Науково-методична стаття.**

Надійшла до редакції 29.10.2021 р.